

서보용 BLDC전동기의 최적설계에 관한 연구

김정철*, 박영일*, 조유현*, 임태빈**, 성하경**
 동아대학교 전기공학과*, 전자부품종합연구소**

Optimal Design of Brushless DC Motor for servo drive

Jung-Chul Kim*, Yong-Il Park*, Yun-Hyun Cho*, Tae-Bin Im**, Ha-Kyoung Seung**
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University*, Korea Electronics Technology Institute**

Abstract - This paper is proposed a selection method of the major design dimension which constrain the maximum acceleration capability and minimum power loss of surface-mounted brushless dc motor with NdFeB permanent magnet for servo drives.

Expressions are derived from the air-gap flux density and the linear current density around the stator periphery and design dimensions. The linear current density is limited by the need to avoid demagnetization.

In this paper, We compute the optimum design dimensions of 2KW BLDC motor with maximum acceleration capability and minimum power loss by using genetic algorithm.

1. 서 론

현재 네오디움 영구자석(Nd-Fe-B)과 같은 고성능 자성재료의 발달로 영구자석을 사용한 가변속도용 전동기에 관심이 집중되고 있다. 이는 최근에 사무자동화장치, 오디오/비디오 장치, 컴퓨터용 하드디스크, CD-ROM 드라이브 등의 서보용 전동기의 수요가 증가하는데 반해 산업사회에서 널리 사용되고 있는 유도전동기가 속도-위치 정밀제어 및 소형화가 어렵기 때문이라고 할수 있다.

이에 반하여 영구자석을 사용한 Brushless DC 전동기는 속도-위치 정밀제어가 용이하며 소형, 경량, 박형화가 가능하다. 그리고 유도전동기에 비해서 큰 정상상태 토크를 가지는 장점이 있으며, 현재 고속·고출력의 Brushless DC 전동기 개발이 요구되고 있다.[1][2]

본 논문에서는 속용성이 뛰어난 서보용 Brushless DC 전동기를 설계하기 위하여 Brushless DC 전동기가 최대가속력, 최소손실, 최대토크를 가지도록 Brushless DC 전동기의 공극자속밀도, 선전류밀도, 설계치수를 최적화하였다. 또한, 최적화한 Brushless DC 전동기의 공극자속밀도, 선전류밀도, 설계치수를 제시한다.

Brushless DC 전동기의 설계치수와 공극자속밀도, 선전류밀도를 최적화하는 방법으로는 자연세계의 진화현상에 기초한 계산모델로서 자연선택의 원리 및 자연계의 생물 유전학, 다윈의 적자생존이론(the survival of fittest)을 기본 개념으로 하는 유전알고리즘을 이용하여 최적화하였다.

2. 기본 특성식 및 제약 조건

본 논문에서 고려하는 표면형 Brushless DC 전동기의 단면을 그림 1에 나타내었다. 표면형 Brushless DC 전동기의 토크는 식(1)과 같다.[3]

$$T = 2\pi r^2 l B_{1g} K_{1s} \quad [N \cdot m] \quad (1)$$

여기서, r 은 회전자반경, l 은 회전자길이, B_{1g} 은 제1고조파 공극자속밀도, K_{1s} 는 제1고조파 선전류밀도이다.

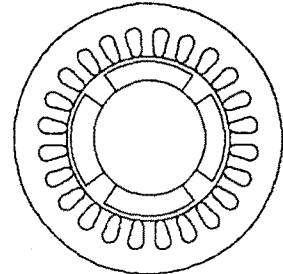


그림1. 표면형 BLDC전동기의 단면도

2.1. 자속밀도 제약

영구자석의 감자곡선을 그림 2에 나타내었으며, 제1고조파 공극자속밀도 B_{1g} 는 식(2)와 같이 주어진다. 식(1)로부터 토크는 B_{1g} 와 K_{1s} 의 곱으로 나타나며, 이 곱이 최대가 될 때 토크가 최대가 된다. B_{1g} 는 치폭 W_t 에 의해서 제한되고 K_{1s} 는 슬롯폭 W_s 에 의해서 제한된다. 치폭과 슬롯폭이 같을때 B_{1g} 와 K_{1s} 의 곱은 최대가 된다. [4]

$$B_{1g} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} B_g \sin\alpha \quad [T] \quad (2)$$

여기서, α 는 영구자석의 극각이다.

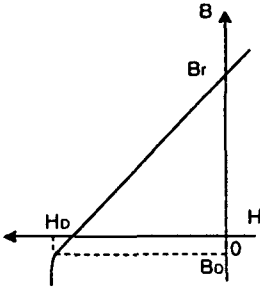


그림2. 영구자석의 감자곡선

2.2. 전류밀도 제약

고정자 슬롯의 선전류밀도는 고정자 권선과 고정자 철에서 발생하는 손실과 열을 제거하기 위한 냉각시스템의 용량과 균형을 이루며 제약을 받는다. 고정자권선의 동손은 식(3)과 같이 주어진다.[5]

$$P_{sw} = \frac{2\pi r \rho_c}{f_s \gamma d_s k_w^2} (1 + \frac{\sigma 2\pi r}{p}) K_1^2 \quad [W] \quad (3)$$

여기서, ρ_c 는 도체의 고유저항, f_s 는 슬롯의 점적율, 계수 γ 는 $W_s/(W_s + W_t)$, d_s 는 고정자슬롯깊이, k_w 는 권선계수, p 는 극수, σ 는 돌출계수이다.

전동기출력은 식(1)을 적용하여 식(4)와 같이 표현할 수 있으며 ω_s 는 고정자 각속도이다.

$$P_b = T \frac{2}{p} \omega_s = \frac{4\pi}{p} B_{1g} K_{1s} r^2 l \omega_s \quad [W] \quad (4)$$

슬롯폭과 치폭은 식(5)과 같이 나타나며, 여기서 Z_1 는 총 슬롯수이다.

$$W_s = W_t = \frac{\pi r}{Z_1} \quad [m] \quad (5)$$

2.3. 회전자반경 및 길이 선택

전동기의 기본적 형태는 회전자 반경과 회전자 길이로 나타난다. 이 두가지 치수는 고정자권선에서 손실이 최소가 되는 값으로 된다. 또한 전동기의 고성능구동을 위해서는 높은 가속력이 요구되므로 관성에 대해서 최대토크를 가지게 회전자반경 및 길이가 결정된다. 정격토크에 대한 전동기의 가속력은 식(6)과 같이 나타나며 ρ_i 는 중량밀도이다.

$$\frac{T}{J_r} = \frac{4 B_{1g} K_{1s}}{\rho_i r^2} \quad [rad/s^2] \quad (6)$$

2.4. 고정자의 요크치수

전동기의 누설을 무시하면, 최대요크자속 Φ_y 은 영구자석 자속의 반이되고, 이때 요크의 두께는 식(7)과 같이 결정된다.

$$d_y = \frac{\Phi_y}{l B_y} \quad [m] \quad (7)$$

여기서, B_y 는 최대요크자속밀도이다. 고정자외경은 식(8)과 같이 나타난다.

$$r_y = r + d_s + d_y \quad [m] \quad (8)$$

2.5. 코어손 모델

전동기의 코어손은 히스테리시스손과 와류손의 합으로 구성된다. 그러나 히스테리시스손은 와류손에 비하여 상당히 적어 무시할 수 있으므로 와류손만을 고려한다. 치에서의 와류손은 식(9)와 같다.

$$P_{ca} = \pi l d_s (2\gamma r + b d_s) \quad [W] \\ \times [k_h B_i^n \omega_s + \frac{4k_e s}{\pi^2 p (1-\sigma)} (B_i \omega_s)^2] \quad (9)$$

여기서, b 는 병렬슬롯인 경우에는 1이고 병렬치인 경우에는 0이다. 요크에서의 와류손은 식(10)과 같이 나타난다.

$$P_{cy} = 2\pi d_y l (r + d_s + d_y/2) \quad [W] \quad (10) \\ \times [k_h B_y^n \omega_s + \frac{4}{\pi} \frac{k_e}{a} (B_y \omega_s)^2]$$

그러므로, 총 코어손실은 식(11)과 같다.

$$P_c = P_{ca} + P_{cy} \quad [W] \quad (11)$$

3. 유전알고리즘을 이용한 최적화

유전알고리즘은 다윈의 적자생존이론과 자연선택의 원리를 기본으로 하며 목적함수의 분포는 개체가 존재하고 있는 가혹한 환경을 나타낸다. 유전알고리즘은 목적함수의 값을 환경에 대한 적합도로서 각 개체들을 최적화시키는 방법이다. 유전알고리즘은 각 세대에 걸쳐 집단에 속해있는 개체들중에서 환경에 가장 적합한 개체들을 선택하여, 선택된 개체들간의 교배, 돌연변이등의 유전작용을 하여 환경에 가장 잘 적응하는 개체만이 진화해서 살아남는다는 자연 진화현상을 나타낸 것이다. 이것

은 다수의 국소해가 존재하는 상황에서도 이를 극복할 가능성이 매우 높기 때문에, 설계치수의 최적화에 적합한 알고리즘이라 생각되어진다. Brushless DC 전동기의 설계치수를 최적화하기 위한 유전알고리즘의 목적함수는 전동기의 토크, 가속력, 동손, 와류손으로 구성되며, 토크 및 가속력은 최대, 동손 및 와류손은 최소가 되게 한다. 설계치수를 최적화하기 위해서 사용한 유전알고리즘의 교배율은 0.8, 돌연변이율은 0.1, 개체수는 100, 세대수는 1000으로 하였다. Brushless DC 전동기의 설계치수를 최적화하는 프로그램 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

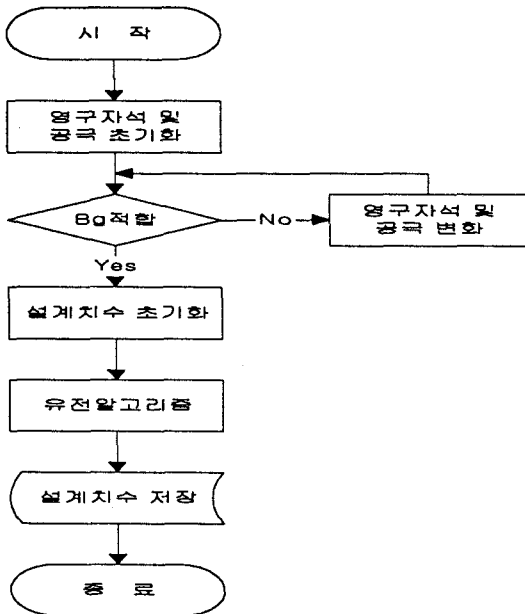


그림 3. 최적화 프로그램 흐름도

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 2[KW], 60[Hz], 3상, 4극, 매극매상 당슬롯수 2인 표면형 Brushless DC 전동기를 설계예로 제시하였다. 표면형 Brushless DC 전동기의 설계치수를 최적화시에 Brushless DC 전동기가 최대토크, 최대가속력, 최소손실이 되도록 하며, Brushless DC 전동기의 회전자반경, 회전자길이, 영구자석길이, 영구자석폭은 최소가 되게 그리고 공극은 기계적 가공성을 고려하여 최대가 되게 하였다. Brushless DC 전동기 설계치수의 최적화를 위해 사용한 유전알고리즘의 각세대에서의 적합도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4를 보면 평균적합도가 0.127에서 진화 후 1.9까지 상승하였으며, 최대적합도는 0.327에서 2.106에 도달하였다.

이것은 환경에 적합한 개체들이 자신들의 자손을 늘리는 현상으로 이해될수 있다. 그러나 변형의 확률로 인해 평균적합도가 최대적합도로 수렴하지는 않을 것이다.[6]

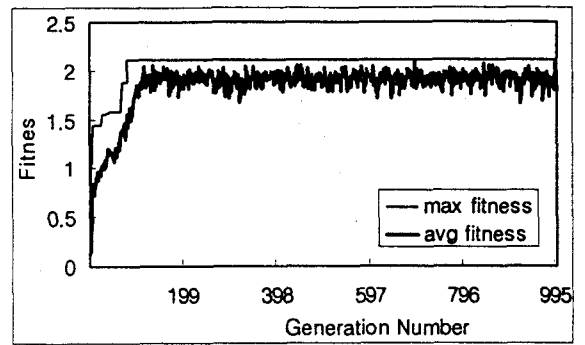


그림 4. 각 세대에서의 적합도곡선

최적화 프로그램을 통한 Brushless DC 전동기의 설계치수를 표 1에 나타내었다.

표 1. BLDC전동기의 설계치수

	제1세대	제1000세대 이후
최대 적합도	0.327	2.1
용 량	4220530[W]	2000[W]
손 실	3361[W]	54[W]
토 크	22390[N·m]	10.6[N·m]
공 극	0.002[m]	0.002[m]
자 석 길 이	0.012[m]	0.007[m]
자 석 각	59[Deg]	75[Deg]
회전자 반경	0.449[m]	0.047[m]
회전자 길이	1.122[m]	0.118[m]
슬롯 깊이	0.112[m]	0.012[m]
요크 길이	0.144[m]	0.017[m]
고정자 반경	0.705[m]	0.076[m]
슬롯 폭	0.058[m]	0.006[m]
치 폭	0.058[m]	0.006[m]
가 속 력	41.2[rad/s ²]	1493[rad/s ²]
도체전류밀도	868947[A/m ²]	3286180[A/m ²]
B_g	0.93[T]	0.84[T]
K_{1s}	21939[A/m]	8753[A/m]

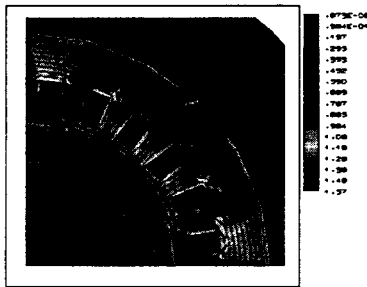
표 1을 보면 제1세대에서는 본 논문에서 설계하고자 하는 Brushless DC 전동기 용량의 약211배가 되는 것을 보이고 있다. 그러나 제1000세대 이후에서는 전동기 용량이 설계하고자 하는 용량과 일치한다. 이를 통하여 제1000세대 이후의 Brushless DC 전동기의 설계치수는 제1세대의 Brushless DC 전동기 설계치수에

비하여 가속력은 약 36배로 크게 설계되었다. 또한 회전자반경 및 회전자길이도 제1세대의 값에 비하여 약 10%정도로 작게 설계되었다. 이 결과로 부터 본 논문에서 최대 가속력, 최소손실, 최소크기, 최대공극을 가지는 2[KW] 표면형 Brushless DC 전동기의 설계치수가 최적화 된 것을 알수 있다.

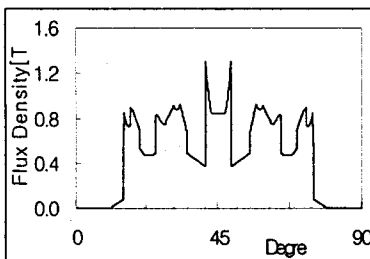
제1세대 및 제1000세대 이후에서의 Brushless DC 전동기의 설계치수를 가지는 모델을 가지고 유한요소해석을 하였다. 제1세대 설계치수를 이용한 Brushless DC 전동기의 자속밀도분포 및 공극 자속밀도곡선을 그림 5에 나타내었다. 그리고 제1000세대 이후의 설계치수를 이용한 Brushless DC 전동기의 자속밀도분포 및 공극 자속밀도곡선을 그림6 에 나타내었다.[7]

그림 5 및 그림 6을 비교하여 보면 제1세대에서의 Brushless DC 전동기는 회전자 및 고정자 부분의 자속밀도가 낮게 분포하고 있으며, 공극 자속밀도곡선에도 상당한 고조파 성분이 포함되어 있는 것을 알수 있다.

이에 비하여 제1000세대 이후의 Brushless DC 전동기는 지나친 국부적 포화없이 회전자 및 고정자에 적당한 자속밀도가 분포하고 있으며, 공극 자속밀도곡선도 제1세대에서의 Brushless DC 전동기에 비하여 고조파 성분이 감소됨을 알수 있다. 이것은 제1세대의 Brushless DC 전동기에 비하여 제1000세대 이후의 Brushless DC 전동기가 낮은 맥동토크를 가지는 것을 나타낸다.

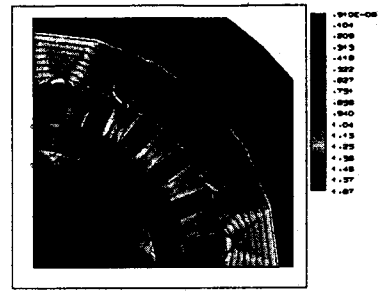


(a) 자속분포도

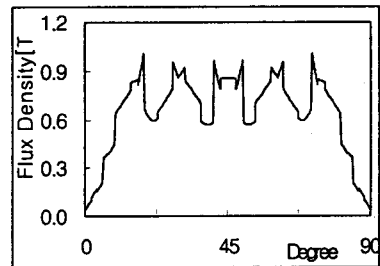


(b) 공극자속밀도곡선

그림5. 제1세대에서의 Brushless DC 전동기



(a) 자속분포도



(b) 공극자속밀도곡선

그림6. 제1000세대이후의 Brushless DC 전동기

5. 결 론

본 논문에서는 속응성이 뛰어난 서보용 Brushless DC 전동기의 설계치수의 최적화방법으로 국소해의 수렴을 피하고, 전체 최적점을 발견할 가능성이 높은 유전 알고리즘을 사용하였다. 그러므로 모든 경우의 수를 전부 검사하지 않고서도 Brushless DC 전동기의 설계치수를 최적화시킬수 있었으며, 최대토크, 최대가속력, 최소손실의 조건을 만족하였다. 보다 많은 제약조건을 첨부한다면 보다 좋은 결과가 나타나리라 생각되어진다.

(참 고 문 헌)

- [1] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Mc Graw-Hill, Inc., 1993
- [2] Gordon R. Slemon, Electric Machines and Drives, Addison-Wesley Publishing co.inc.
- [3] Jacek F. Gieras and Mitchell Wing, Permanent Magnet Motor Technology, Marcel Dekker, Inc., 1997
- [4] Theodore L. Baith, Electricity Consumption Minimisation Through the Use of Electric Variable Speed System, 1990
- [5] P. Hammond and R. L. Grimsdale, Brushless Servomotors, Clarendon Press, Oxford, 1990
- [6] David E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Welsrly publishing company, inc
- [7] A.J.Baker, D.W.Peper, Finite Elements 1-2-3 McGraw-Hill.inc, 1991